

Distribución espacial de la salinidad del suelo en un bosque del chaco semiárido

Figuroa, M. E.¹ y G. Lorenz²

Introducción

Las comunidades biológicas, como los bosques, se encuentran estructuradas en muchas escalas espaciales y temporales. Los procesos que en ellas ocurren tienen su origen en fuerzas o factores externos, que las condicionan, y también en factores internos, producto de las interacciones bióticas. Comprender los procesos ha sido desde siempre uno de los objetivos más desafiantes de la ecología vegetal. Dado que los procesos son difíciles de representar visualmente, se ha recurrido al estudio de los patrones que éstos generan para poder dilucidarlos. Los patrones son expresiones de procesos subyacentes, que se pueden percibir y representar (Fig. 1).

El uso de técnicas de análisis espacial, como el uso de geoestadística en ecología, pretende en último término entender las interacciones entre las especies y sus recursos en ambientes heterogéneos. La geoestadística ha permitido cuantificar la escala y grado de variación espacial de los recursos disponibles para plantas, y su relación con la distribución de las mismas (Gallardo & Maestre, 2008). Esta variación espacial es clave para explicar procesos ecológicos a diferentes escalas espacio-temporales (Fortin & Dale, 2005).

En este capítulo se expone un caso de estudio donde se ensaya el uso de técnicas geoestadísticas para analizar la distribución espacial de la salinidad del suelo de un bosque xerófito semiárido y su relación con la distribución de plantas leñosas, en pequeña escala ecológica.

¹ Lic. Ecología y Conservación del Ambiente. Dr. Cs. Forestales (Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero). Av. Belgrano (s) 1912. 4200 Santiago del Estero, Argentina. E-mail: meugeniaf83@yahoo.com.ar.

² Ing. Agr. (Univ. Hohenheim Alemania). Dr. Ciencias Agrarias (Univ. Hohenheim Alemania). Profesor Cátedra Edafología. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912. 4200 Santiago del Estero, Argentina. E-mail: glorenz@unse.edu.ar.

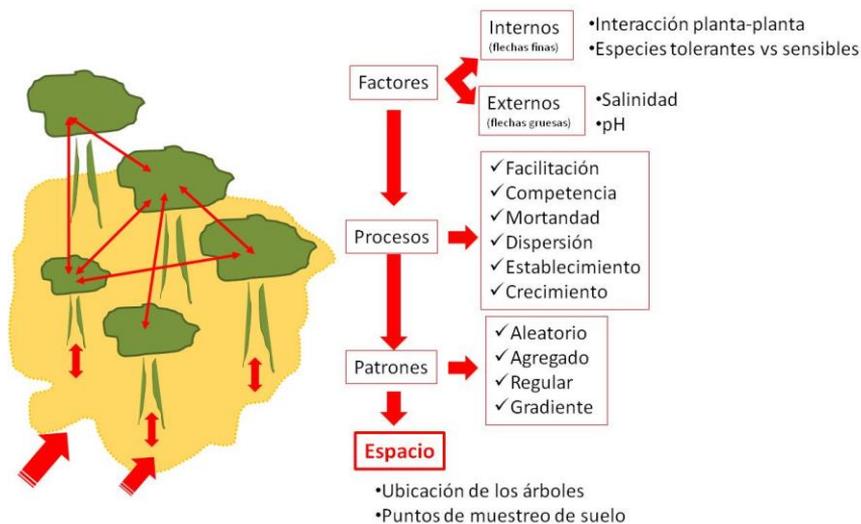


Figura 1. Representación esquemática de la relación entre factores- procesos- patrones que ocurren en las comunidades biológicas. Los patrones espaciales son originados por procesos, en los cuales actúan diferentes factores, todo lo cual está condicionado por el espacio.

Los resultados obtenidos con la herramienta empleada tienen implicancias directas en la toma de decisiones sobre el manejo del bosque a nivel predial o de parcela. Además, surge como recomendación considerar la estructura espacial de la salinidad del suelo y de las variables bióticas, en los diseños de muestreo, e incluir al espacio como variable explicatoria en los estudios ecológicos, y en las prácticas de manejo y restauración.

Análisis espacial en ecología forestal

El análisis espacial en ecología forestal ha permitido inferir procesos ecológicos que ocurren en los bosques (como por ejemplo: dispersión, establecimiento, crecimiento, mortalidad, competencia, facilitación, depredación, invasión, etc.) mediante la descripción de patrones espaciales (Camarero & Rozas, 2006).

En un bosque, tanto los componentes bióticos como los abióticos presentan generalmente marcados patrones espaciales, producto de las interrelaciones entre los componentes, que se condicionan mutuamente. De este modo, el medio abiótico, como por ejemplo las propiedades físico-químicas del suelo que en sí mismas presentan heterogeneidad espacial, ejerce control sobre las poblaciones de organismos sésiles, como los árboles, y de esta manera filtra la localización espacial de dichos organismos dentro del bosque. Este tipo de proceso, tal como lo explican Legendre & Legendre (1998), puede ser explicado por el modelo de

control ambiental, en el cual factores externos (climáticos, físicos, químicos) controlan a las comunidades biológicas, ejerciendo dependencia espacial inducida sobre ellas. Es decir, si estos factores externos están espacialmente estructurados, sus patrones se verán reflejados sobre las comunidades. Por ejemplo, en los suelos salinos de las regiones áridas y semiáridas, la micro-heterogeneidad espacial de la salinidad del suelo resulta en un mosaico de condiciones que afecta la distribución de las especies en pequeña escala ecológica (Carter, 1975; Bui, 2013).

Por otro lado, también actúan factores internos o inherentes a las comunidades, los cuales son explicados por el modelo de control biótico. Este modelo predice que las interacciones intra e inter específicas que ocurren dentro de las comunidades (facilitación, competencia, grupos funcionales, etc.) pueden resultar en patrones espaciales que causan verdadera autocorrelación espacial (Legendre & Legendre, 1998). Por ejemplo, una estrategia adaptativa de muchas especies que crecen en suelos salinos es evitar la etapa más crítica de su ciclo de vida, la germinación, asegurando su reproducción por medio de la propagación vegetativa (Elmqvist & Cox, 1996; Grigore *et al.*, 2010). Esta forma de propagación genera patrones espaciales agregados o contagiosos (Shimizu *et al.*, 2002).

Otros procesos que generan patrones espaciales producidos por factores internos a las comunidades, muy frecuentes en hábitats adversos, son las interacciones planta-planta, muy estudiadas en ecología vegetal (Yarranton & Morrison, 1974; Castellanos *et al.*, 1994). Por ejemplo, en los procesos de nucleación, las áreas abiertas son colonizadas por “constructores” de montículos, sitios que favorecen el establecimiento de plántulas de diferentes arbustos leñosos que eventualmente compiten y reemplazan a los colonizadores (Castellanos *et al.*, 1994; Bochet *et al.*, 1999; Aguiar & Sala, 1999; Bertiller *et al.*, 2004). Estos sitios son denominados islas fértiles que facilitan la sucesión vegetal en ambientes áridos y semiáridos (Aguiar & Sala 1999; Bochet *et al.*, 1999; Maestre & Cortina, 2002; Escudero *et al.*, 2004; Bertiller *et al.*, 2004; Moffett *et al.*, 2010). En las primeras etapas de la sucesión, la facilitación suele predominar sobre la competencia (Castellanos *et al.*, 1994). La facilitación parece explicar el agrupamiento de individuos y/o especies que muy frecuentemente se encuentran en ambientes estresantes (Tirado & Pugnaire, 2003; Callaway & Pennings, 2000).

Las interacciones de facilitación que ocurren dentro de parches de vegetación mejoran localmente las condiciones microclimáticas y las propiedades físicas y químicas del suelo, e influyen en la morfología y fisiología de las plantas vasculares vecinas (Bertness & Hacker, 1994; Hacker & Bertness 1995; Bertiller *et al.*, 2004). Sin embargo, las especies facilitadas pueden poseer mayor habilidad competitiva y cuando logran establecerse operar mecanismos de inhibición que producen cambios degenerativos en los colonizadores (Castellanos *et al.*, 1994). Las especies altamente tolerantes al estrés generalmente presentan baja capacidad competitiva en suelos no salinos frente a las menos tolerantes o sensibles (Pendleton *et al.*, 2010).

No obstante, generalmente las comunidades responden a una combinación de procesos internos y externos que generan diferentes patrones espaciales. Por este motivo, el estudio de los patrones espaciales pretende en último término entender las interacciones entre las especies y sus recursos en ambientes heterogéneos.

Salinidad y vegetación

La salinización del suelo en ambientes semiáridos ocurre muy frecuentemente. El origen de los suelos salinos puede ser primario, cuando las causas son naturales, o secundario, cuando se originan por causas antrópicas por el manejo inadecuado de la irrigación en la agricultura (Rogers *et al.*, 2005; Lorenz, 2009; Taleisnik & López Launestein, 2011). La salinización es uno de los procesos de degradación del suelo más extendido en todo el planeta y se considera una causa importante de la desertificación. Los suelos salinos ocupan en el mundo 260 millones de hectáreas aproximadamente (IUSS WRB, 2014), y afecta a 100 países (Schofield & Kirkby, 2003; Grigori *et al.*, 2010). La tendencia mundial indica que la degradación del suelo por salinización se verá acentuada por el cambio climático en las próximas décadas (Schofield & Kirkby, 2003).

La salinidad del suelo restringe la productividad de los cultivos y de la vegetación natural de estos hábitats. La elevada salinidad hace que el suelo se comporte como un suelo fisiológicamente seco, generando estrés salino en las plantas. En nivel individual dentro de una planta, el estrés salino afecta los principales procesos como fotosíntesis, síntesis de proteínas, metabolismo de energía y lípidos (Parida & Das, 2005). La germinación es la etapa del ciclo de vida de la planta que generalmente se ve más afectada negativamente, aun en halófitas (Ungar 1978). Las halófitas, plantas tolerantes a la sal, han desarrollado una serie de respuestas a lo largo de la evolución que involucran todo el ciclo de vida de la planta.

En nivel comunitario, en los suelos extremadamente salinos, la vegetación natural, dominada por las halófitas, se caracteriza por una baja diversidad taxonómica y morfológica (Parida & Das, 2005). Cuando la salinidad disminuye, la vegetación se enriquece y su diversidad fisiológica es más amplia, lo cual le permite hacer frente a condiciones salinas y no salinas (Ragonese 1951).

En bosques naturales establecidos en terrenos salinos, los árboles poseen estrategias para extraer agua del suelo con potenciales muy elevados, como las presiones osmóticas observadas en especies arbóreas del Chaco, que varían entre 40 y 75 bares (Mitlöhner, 1990). Los árboles, que generalmente crecen en suelos con excesos de sales, poseen un sistema radical muy extendido, con el cual penetran profundamente en el suelo para captar agua freática. Entre las especies arbóreas con estas características están, *Tabebuia nodosa*, *Geoffroea decorticans* y sobre

todo *Prosopis ruscifolia*, muy abundante en suelos afectados por salinidad en la región del Chaco (Roth & Giménez, 1997; Taleisnik & López Launestein, 2011).

La forestación con especies tolerantes es una práctica de recuperación de suelos degradados por salinidad que permite además, la incorporación productiva de estas superficies (Bui, 2013; Huchzermeyer & Flowers, 2013). Sin embargo, se requiere un manejo integrado, sobre todo en forestaciones a gran escala, donde se debe controlar que el uso del agua freática salina por parte de los árboles no produzca la salinización de la rizósfera (Taleisnik & López Launestein, 2011). En Argentina, la forestación en suelos afectados por salinidad con especies arbóreas del género *Prosopis*, tiene un alto potencial para promover el desarrollo de nuevos sistemas de producción en dichos ambientes (Taleisnik & López Launestein, 2011).

Una de las características fundamentales de los ambientes salinos es alta la variabilidad de la salinidad del suelo (Larcher, 1977; Rogers *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2011). El contenido de sal del suelo puede variar dramáticamente con la estación, la profundidad y a través de un sitio (Rogers *et al.*, 2005; Bazihizina *et al.*, 2012). Además influyen la textura del suelo, la micro-topografía y los cambios en la cobertura vegetal, que modifican la química e hidrología del suelo (Carter, 1975; Larcher, 1977; Zhang *et al.*, 2014). Esta propiedad se debe fundamentalmente a la gran movilidad de las sales solubles, por lo cual su acumulación en el suelo no es homogénea.

En escalas ecológicas más finas, como por ejemplo, en la relación suelo-planta, las raíces pueden inducir gran heterogeneidad espacial de las propiedades químicas del suelo, como salinidad y pH. Las halófitas, en general, influyen en la dinámica de sales y agua en el perfil del suelo (Chaudhri *et al.*, 1964; Cisneros *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2011). Bajo la cobertura vegetal existe un menor ascenso capilar, mayor infiltración y menor tasa de evaporación, lo cual tiende al lavado de sales en superficie (Cisneros *et al.*, 2008). Sin embargo, también se ha encontrado que la salinidad puede incrementar en las capas superficiales del suelo debajo de arbustos cuyas hojas excretan sales por medio de glándulas, como las especies del género *Atriplex* (Sharma & Tongway, 1973; Rostagno *et al.*, 1991).

En escalas aún más finas, las propiedades químicas y físicas de un suelo salino se ven modificadas por la acción de microorganismos como los que conforman la costra biológica. En una costra biológica, la asociación simbiótica entre algas, hongos, líquenes, hepáticas y briófitos en diferente grado de complejidad y evolución, favorece la germinación de las semillas, retiene humedad y contribuye al inicio de la sucesión vegetal (Belnap *et al.*, 2003).

La relación suelo salino-vegetación es muy compleja por lo cual requiere un abordaje que integre aspectos fisiológicos, fisonómicos, genéticos, ecológicos, productivos. El abordaje del análisis espacial permite integrar todos estos aspectos en el sitio donde ocurren los procesos, ya que el espacio condiciona la distribución de las variables y por lo tanto la relación entre ellas.

Salinidad en el suelo de un bosque del Chaco Semiárido

La salinidad del suelo es un factor limitante para el desarrollo de la vegetación. Teniendo en cuenta que una de sus principales características es la alta variabilidad espacial y temporal, el análisis espacial permite cuantificar la escala y grado de variación espacial, y describir su patrón (aleatorio, regular, gradiente, agregado). A continuación, se describe un estudio desarrollado en una parcela de bosque nativo chaqueño bajo influencia salina, para describir la variación espacial de la salinidad del suelo y su relación con la distribución de las leñosas.

El caso concreto de estudio se presenta en una parcela de bosque xerófito de *Aspidosperma Quebracho-blanco* y *Shinopsis lorentzii*, perteneciente a la ecorregión forestal Chaco Semiárido, en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. Este bosque se desarrolla en un sector de interfluvio entre los ríos Dulce y Salado. Se ubica en el entorno de la llanura aluvial antigua del río Mailín (antiguo curso unido al río Dulce) (Fig. 2).

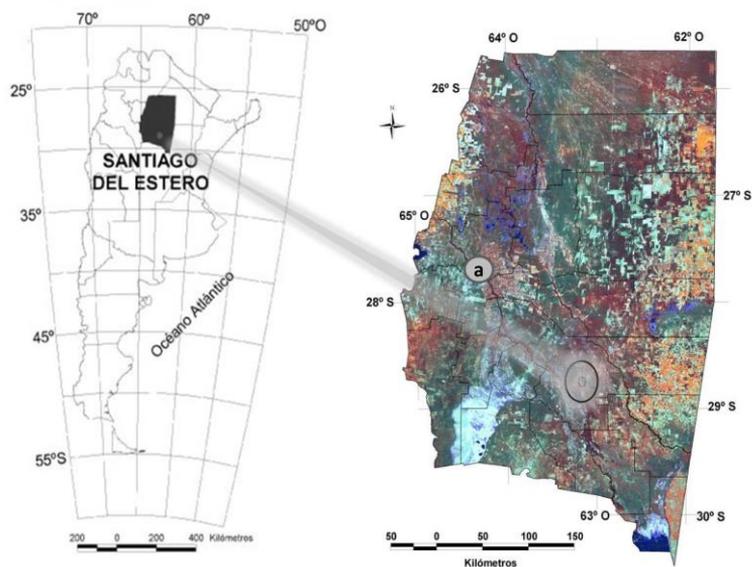


Figura 2. Ubicación del área estudiada.

En esta porción del territorio, la combinación de factores externos adversos, climáticos y edáficos, sumado al uso extractivo por parte de las comunidades humanas, dieron como resultado un bosque bajo, abierto con escasa cobertura arbórea (Fig. 3).

El principal condicionante, se debe al clima semiárido, con precipitaciones media anual de 650 mm, y un déficit hídrico medio anual de 800 mm (Angueira *et al.*,

2007). El balance hídrico del suelo muestra déficit de agua en varios meses sobre todo a principios de la primavera (Ledesma & Boletta, 1972).

La segunda restricción es edáfica, ya que debido a la elevada evapotranspiración, las lluvias no son suficientes para lavar las sales solubles en profundidad dentro del perfil del suelo. Por lo tanto, las sales son precipitadas y acumuladas en el espacio de mayor exploración por parte de las raíces de las plantas, o espacio de enraizamiento. En el sitio de estudio este espacio de enraizamiento se ubica aproximadamente en los primeros 50 cm del suelo.

En la llanura aluvial del río Mailín se identificaron los suelos Fluvic Solonchak (Siltic) y Eutric Fluvisol (Loamic). Los suelos *Solonchak* ocupan en el mundo 260 millones de hectáreas aproximadamente; presentan una conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo mayor 15 dS/m (IUSS WRB, 2014).



Prosopis ruscifolia

Tabebuia nodosa

Figura 3. Imágenes del bosque de la parcela estudiada y de especies tolerantes a la salinidad del suelo propias del bosque xerófilo chaqueño con influencia salina.

En la parcela se encontró un valor medio de CE de 10.22 dS/m (D.E.: 9.6), dentro del primer horizonte considerado (0-20 cm). En el horizonte siguiente, 20-50 cm, la CE aumentó alrededor del doble de la CE del primer horizonte, siendo de 21.49 dS/m (D.E.: 12). El valor medio de la CE, ponderado por la profundidad, fue de 16.98 dS/m (D.E.: 11). Estos valores corresponden a suelos entre fuerte a extremadamente salinos, dónde sólo pueden sobrevivir las plantas adaptadas y altamente tolerantes a las altas concentraciones de sal en la rizósfera (Parida & Das, 2005). Estas especies se denominan halófitas.

En cuanto a la medida de acidez/alcalinidad del suelo, el pH promedio en 0-20 cm, fue de 7.57 (D.E.: 1.19) y el pH promedio de 20-50 cm fue de 7.84 (D.E.: 0.88). En general el valor del pH rondó la neutralidad con tendencia a la alcalinidad, lo cual es esperable para un bosque típico de la región (Lorenz, 1995; Chaco Red Agroforestal, 1999; Lorenz, 2009; Coirini *et al.*, 2012).

Los altos valores de pH y CE son esperables para los suelos de la región semiárida chaqueña (Coirini *et al.*, 2012). La mayor alcalinidad indica una regulación del pH por sales de sodio, lo cual es desfavorable para las plantas, ya que afecta la disponibilidad de nutrientes, y posee efectos deletéreos en las propiedades físicas y químicas del suelo (Shainberg, 1975). Se ha encontrado también que ambos factores (CE y pH elevados) pueden afectar la asociación simbiótica de los arbustos halófitos con los hongos micorrícicos arbusculares (Soteras *et al.*, 2013).

En cuanto a la composición de especies, en la parcela estudiada, fue la que se espera encontrar en la matriz forestal de la región (Giménez *et al.*, 2011). La distribución de la diversidad varió según cambios en las condiciones edáficas y de microrrelieve. En la parcela se relevaron 29 especies leñosas, entre las cuales las más abundantes fueron *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Prosopis ruscifolia*, *Ziziphus mistol*, *Prosopis nigra* y *Schinopsis lorentzii*.

Análisis del patrón espacial de la salinidad

Para analizar el patrón espacial de la salinidad del suelo del bosque, la técnica ensayada fue la geoestadística. Esta herramienta permite caracterizar atributos del patrón espacial de variables continuas, como así también se ha aplicado para realizar interpolaciones en lugares no muestreados (Gallardo & Maestre, 2008; Journel & Huijbregts, 1978). La geoestadística ha permitido cuantificar la escala y grado de variación espacial de propiedades físicas-químicas del suelo, así como su relación con la distribución de los individuos. El objetivo final de aplicar esta técnica en ecología es explicar procesos ecológicos a diferentes escalas espacio-temporales (Gallardo & Maestre, 2008).

La función básica de estructura que describe la variabilidad espacial del fenómeno estudiado es el semivariograma (Gallardo & Maestre, 2008; Journel & Huijbregts, 1978). La representación gráfica del semivariograma descompone la variabilidad espacial de la variable observada (eje y) entre clases de distancias (eje x). Es decir, que para el presente caso de estudio se pretende graficar las diferencias o

semivarianzas de la salinidad del suelo del bosque, en función de distancias dentro de la parcela.

La forma del semivariograma obtenido indica la estructura del patrón. Para cuantificar el grado y la escala de la variación espacial de la salinidad, se debe ajustar una función al semivariograma empírico, y de esta manera estimar el semivariograma teórico o modelado. Los modelos más utilizados son: esférico, exponencial, gaussiano y el modelo lineal (Gallardo & Maestre, 2008). El ajuste a una función permite extraer los parámetros que definen el grado y la escala de la variación. En los análisis se empleó software R 2.15.2 R, `gstat package` (R Core Team, 2015) bajo el entorno de RStudio.

Para aplicar esta técnica, se diseñó un muestreo basado en unidades discretas (Maestre & Escudero, 2008). Se definió un cuadrado de 50 m x 50 m, subdividido en unidades de muestreo contiguas de 5 m x 5 m (Fig. 4). El muestreo en unidades contiguas permite una descripción más fina del patrón espacial debido a que no se pierde información por los espacios no muestreados. Aunque esto no garantiza que los datos sean representativos de todo el proceso ecológico en estudio, (población de inferencia en términos de las estadísticas paramétricas), lo son más bien de la representación espacial de la extensión del proceso (Fortin & Dale 2005).

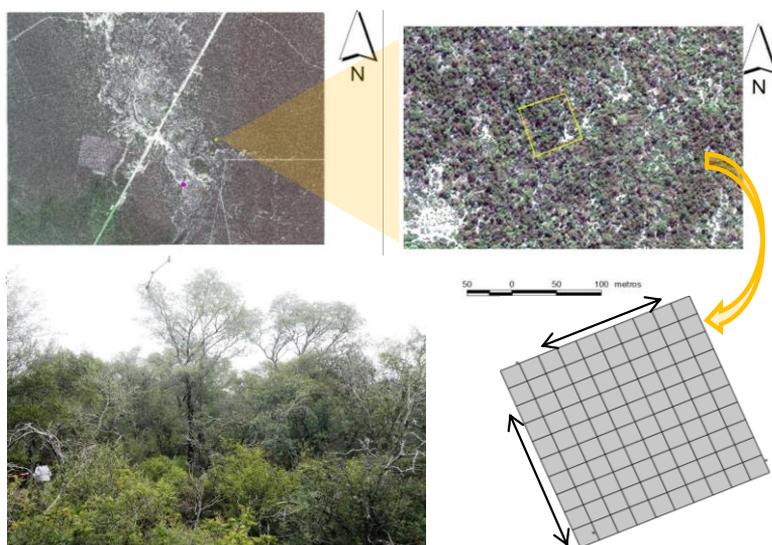


Figura 4. Diseño de la parcela y unidades de muestreo en el bosque adyacente a la llanura aluvial del río Mailín.

En cada unidad se registraron las coordenadas cartesianas (x , y) y se tomaron muestras compuestas de suelo en dos profundidades: 0-20 cm y 20-50 cm. En total se analizaron 220 muestras. Para poder realizar una interpretación ecológica de los valores de CE (dS/m) obtenidos en laboratorio, por el método rápido en suspensión suelo: agua de 1:2.5, se corrigió el valor medido para obtener la CE en

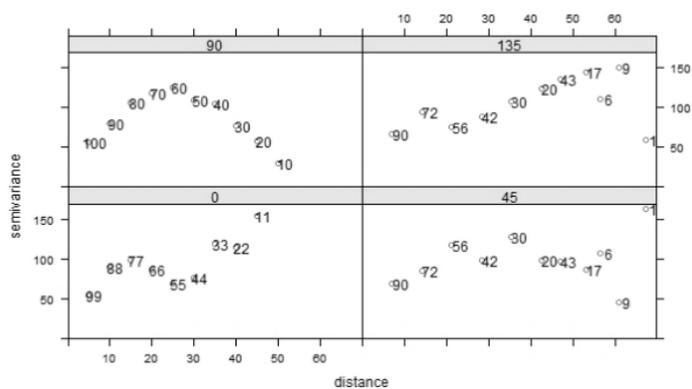
la solución del suelo (Lorenz, 2005; Sonmez *et al.*, 2008). Además se midió el pH en agua para cada muestra.

Los semivariogramas obtenidos brindan información del comportamiento espacial de las variables analizadas. Tanto la CE como el pH presentaron estructura espacial, es decir variabilidad en función del espacio. Dicho comportamiento puede ser el mismo en todas las direcciones del espacio (semivariograma omnidireccional), y ser un comportamiento isotrópico, o bien la variación espacial puede ser diferente en las distintas direcciones del espacio (anisotropía) (Legendre & Fortin, 1989; Gallardo & Maestre, 2008).

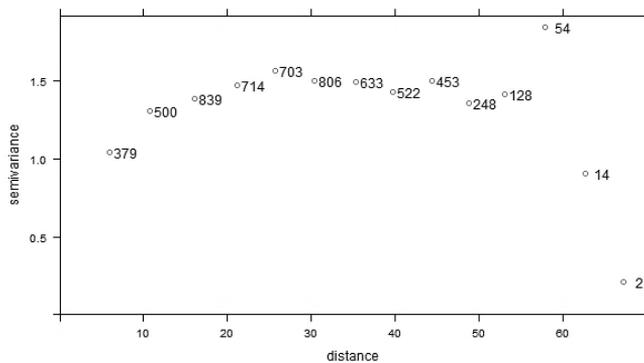
Luego de realizar una inspección visual de los semivariogramas, calculados por separado para cuatro direcciones del espacio (semivariogramas direccionales: N-S, NE-SO, E-O y NO-SE), se observó que la forma de los semivariogramas cambia según las cuatro direcciones (Fig. 5). A pesar de ello, los “nuggets”, rangos y “sill” fueron aproximadamente similares, por lo tanto se justifica el empleo de un modelo isotrópico que agrupe todas las direcciones, ya que se considera que siguen el mismo modelo básico de continuidad espacial (Gallardo & Maestre, 2008).

Por esto, se utilizó un modelo isotrópico para CE y pH. En la Figura 5, se ejemplifican, sólo para la CE (0-20 cm), los semivariogramas direccionales y se muestran los semivariogramas medios para el pH.

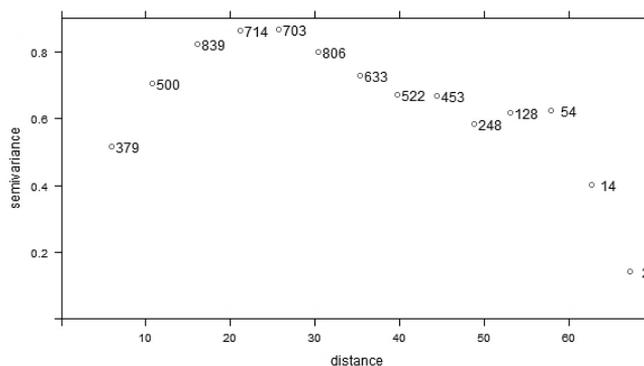
Para cada semivariograma empírico se ajustó una función, a partir de la cual se extrajeron los parámetros que definen el grado y la escala de la variación espacial observada (Gallardo & Maestre, 2008). Estos parámetros son: *rango*, “*sill*”, y “*nugget* o *efecto pepita*”. En todos los casos se ajustaron modelos esféricos a los semivariogramas experimentales. A modo de ejemplo se presenta la función ajustada y sus respectivos parámetros, para la salinidad (Fig. 6). A continuación, se describe el significado de los parámetros obtenidos del modelo:



A



B



C

Figura 5. Representación de la semivarianza a intervalos de distancia creciente para la salinidad y el pH. A- Semivariograma direccionado para CE (ds/m) 0-20cm. B- Semivariograma medio para pH 0-20 cm y (C) para pH 20-50cm. Los números graficados corresponden al número de pares empleados para calcular la semivarianza en cada clase de distancia.

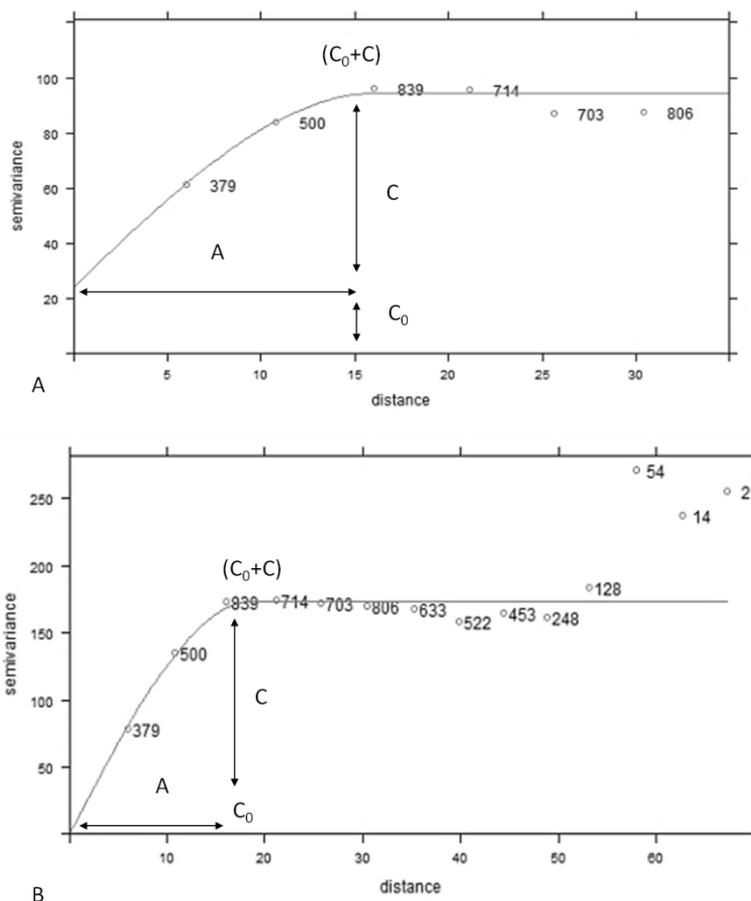


Figura 6. Modelo esférico ajustado (línea) a los semivariogramas medios empíricos (puntos) para la CE 0-20 cm (A) y CE 20-50 cm (B). Distancia en metros. Los números graficados corresponden al número de pares empleados para calcular la semivarianza en cada clase de distancia.

- El *rango* (A) indica el tamaño del área de influencia o mancha de autocorrelación positiva de la variable, es decir la distancia hasta la cual las muestras son espacialmente dependientes unas de otras
- *Meseta o sill* (C_0+C), es el umbral donde se estabiliza la curva. Corresponde a la varianza de las muestras.
- *Nugget o efecto pepita* (C_0), es la discontinuidad en el origen que normalmente indica que la autocorrelación empieza en escalas más finas que las detectadas con el muestreo. Mide el grado de error analítico o de muestreo. Este parámetro es la varianza no explicada por el modelo.

A partir de estos parámetros se puede calcular la *variabilidad estructural relativa* (RSV) o proporción de la varianza explicada por el espacio ($C/(C_0+C) \times 100 \%$). La RSV es la relación entre la varianza estructural (C) y la meseta. Indica la parte

de la varianza que se encuentra estructurada espacialmente. Un alto cociente nos indica una variable espacialmente muy predecible. El grado de dependencia en función del RSV entre muestras es clasificado como: $\leq 25\%$ bajo, entre 25% y 75% medio y de $\geq 75\%$ alto (Gallardo & Maestre, 2008).

Las funciones ajustadas mostraron en general dependencia espacial en un rango menor a 20 metros (Fig. 6). Para la CE de 0-20 cm, el modelo esférico ajustado mostró una variación espacial del 74% (RSV). En tanto que la CE de 20-50 cm presentó una alta variabilidad estructural (RSV 100%) en un rango de 18 metros.

Si bien para el pH, no se muestra el modelo ajustado, visualmente se puede apreciar en el semivariograma experimental (Fig. 5) un rango aproximado de 25 m.

De esta manera, por medio del análisis geoestadístico, la variabilidad espacial de la salinidad del suelo del bosque en la parcela pudo ser cuantificada. La salinidad del suelo del bosque presentó heterogeneidad espacial con un patrón agregado cuya mancha de influencia fue menor a 20 metros. Los factores que explican este patrón agregado pueden ser internos o externos. Es decir la salinidad intrínsecamente se distribuye de manera agregada o bien su patrón se ve modificado por factores externos que en sí mismos están estructurados espacialmente.

El patrón espacial de la salinidad influye en la distribución de las plantas, pero a su vez las plantas introducen modificaciones en dicho patrón. Por lo tanto, el patrón observado en el análisis espacial, es resultado de la interacción suelo-vegetación y de la escala de observación.

La vegetación, como ya se ha explicado anteriormente, puede modificar las propiedades edáficas y su distribución espacial. Para indagar acerca de este planteo se calculó el semivariograma para el índice de diversidad de leñosas del bosque, H' Shannon, calculado a partir de la abundancia de especies leñosas por unidad de muestreo contigua de 5 m x 5 m (Fig. 7). La variabilidad estructural relativa para el índice de H' Shannon fue de un 44 % en un rango de 20 metros.

El patrón espacial de las leñosas y de la salinidad mostró un rango similar, menor a 20 metros. Es decir, tanto la salinidad como la vegetación del bosque presentaron patrones agregados, ambos con rangos muy semejantes en la escala espacial analizada. La coincidencia entre ambos patrones indica que la relación suelo salino-vegetación tiene un patrón espacial marcado, y que los cambios en la vegetación probablemente modificarán el patrón espacial de la salinidad del suelo.

Otros estudios en escalas más amplias permitirán comprender el comportamiento de la salinidad en relación a otros factores y procesos que operan en escalas ecológicas mayores, como por ejemplo la distancia al cauce de los ríos, la pendiente regional del terreno, etc.

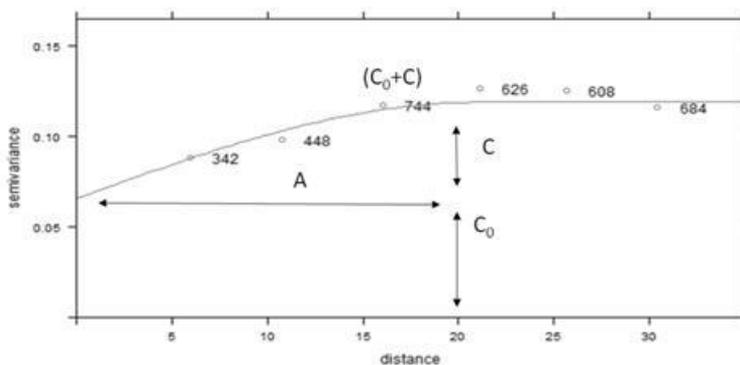


Figura 7. Semivariograma empírico (puntos) y el modelo esférico ajustado (línea) para el índice de diversidad de leñosas H'Shannon. Distancia en metros. Los números graficados corresponden al número de pares empleados para calcular la semivarianza en cada clase de distancia.

Los parámetros calculados pueden ser empleados en nuevos estudios sobre ambientes salinos, los cuales deberían contemplar en el diseño de muestreo, la dependencia espacial de la salinidad y del pH, así como también de variables bióticas, e incluir al espacio como variable explicatoria en los análisis posteriores.

Los resultados obtenidos con este tipo de estudios tienen implicancias prácticas y directas en la toma de decisiones sobre cómo intervenir y manejar los recursos en el nivel de la parcela. En este sentido, se podrían aplicar los modelos de patrones espaciales en programas de restauración y monitoreo de ecosistemas degradados a escala local.

Por otra parte, con fines de investigación en ecología, los resultados pueden ser empleados en estudios temporales, para evaluar la evolución del proceso de sucesión vegetal, los cambios en la salinidad del suelo según las estaciones del año, la relación con otros factores edáficos, como así también en experimentos de trasplante de especies con distinto grado de tolerancia fisiológica, teniendo presente, en todos los casos, la componente espacial de cada fenómeno estudiado.

Consideraciones finales

El uso de herramientas de ecología espacial permitió detectar los patrones espaciales de la salinidad del suelo del bosque. Generalmente se ha encontrado que la salinidad del suelo puede presentar un patrón en gradiente a lo largo de una secuencia, desde la costa al interior, o desde el centro de un salar hacia zonas más elevadas del terreno. La vegetación y sus parámetros (composición, riqueza, estructura), suelen variar, en estos casos, en función de dicho gradiente (regiones

costeras, salares de interior) y son considerados indicadores del tenor salino. Sin embargo, dentro de un bosque, la distribución de las sales puede ser aún más variable y su patrón menos fácilmente percibido. El uso de la geoestadística permite identificar los patrones, modelarlos e interpolarlos en mapas para una mejor interpretación del fenómeno estudiado. En este sentido, el análisis realizado permitió detectar el patrón espacial de la salinidad dentro del bosque, determinando así que se distribuye en manchas o parches y que está correlacionado espacialmente con la distribución de las plantas leñosas. Es decir que, en la escala estudiada, la salinidad no siguió un patrón aleatorio ni en gradiente, sino que más bien estuvo condicionado por la distribución de la vegetación. Esto implica que las modificaciones en la cobertura vegetal incidirán en el patrón de la salinidad del suelo del bosque.

Existe una multiplicidad de técnicas y métodos de análisis de datos multivariantes y estructura espacial, que permiten evaluar conjuntamente la relación entre variables bióticas (ej.: composición de especies halófitas), abióticas (ej.: salinidad del suelo) y el patrón espacial de dicha relación. Existen métodos que se basan en ordenaciones con datos brutos, y otros que trabajan con matrices de similitud/distancia a partir de dichos datos (Olano & Luzuriaga, 2008). Entre los primeros métodos, las técnicas geoestadísticas aplicadas sobre ordenaciones, utilizan directamente los valores de los ejes de una ordenación y su posición en el espacio físico, para construir un semivariograma, a partir de datos multivariados. Aunque esta técnica ha sido empleada con diversos objetivos en ecología, sería oportuno desarrollar y profundizar aún más sus aplicaciones en el campo de la ecología forestal.

Referencias bibliográficas

- Aguiar, M. R. & O.E Sala. 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 14: 273–277.
- Angueira, C. D. Prieto, J. López y G. Barraza. 2007. SIG Santiago del Estero. INTA.
- Bazihizina, N., E. G., Barrett-Lennard, & T. D. Colmer, 2012. Plant growth and physiology under heterogeneous salinity. *Plant and Soil*, 3541-2, 1-19
- Belnap, J., B. Büdel, & O. L. Lange, 2003. Biological soil crusts: characteristics and distribution. In *Biological soil crusts: structure, function, and management* pp. 3-30. Springer Berlin Heidelberg
- Bertiller MB; AJ Bisigato; A L Carrera; H. F. Del Valle. 2004. Estructura de la vegetación y funcionamiento de los ecosistemas del monte Chubutense. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 39 3-4: 139-158
- Bertness, M. D., & Hacker, S. D. 1994. Physical stress and positive associations among marsh plants. *American Naturalist*, 363-372.
- Bochet, E., Rubio, J. L., & J. Poesen. 1999. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. *Catena*, 381, 23-44
- Bui E.N. 2013. Soil salinity: A neglected factor in plant ecology and biogeography. *Review. Journal of Arid Environments* 92: 14-25

- Callaway, R. M., & S. C. Pennings. 2000. Facilitation may buffer competitive effects: indirect and diffuse interactions among salt marsh plants. *The American Naturalist*, 156(4), 416-424
- Camarero, JJ & V. Rozas. 2006. Técnicas de análisis espacial de patrones de superficies y detección de fronteras aplicadas en ecología forestal. *Invest Agrar: Sist Recur For* 15(1): 66-87.
- Carter, D. L. 1975. Problems of salinity in agriculture. In *Plants in saline environments* (pp. 25-35). Springer Berlin Heidelberg.
- Castellanos, E. M., M. E. Figueroa, & A. J. Davy. 1994. Nucleation and facilitation in saltmarsh succession: interactions between *Spartina maritima* and *Arthrocnemum perenne*. *Journal of Ecology*, 239-248
- CHACO, Red Agroforestal. Estudio integral de la región del parque chaqueño. Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas Préstamo BIRF, 1999, no 4085-AR.
- Chaudhri, I. I., Shah, B. H., Naqvi, N., & Mallick, I. A. 1964. Investigations on the role of *Suaeda fruticosa* Forsk in the reclamation of saline and alkaline soils in West Pakistan plains. *Plant and Soil*, 21(1), 1-7.
- Cisneros, JM; A Degioanni; JJ Cantero & A Cantero. 2008. Caracterización y manejo de suelos salinos en el área pampeana. In Taleisnik, E; K Grunberg & G. Santa María (eds.). *La salinización de suelos en la Argentina: su impacto en la producción agropecuaria*, pp 17-46. EDUCC (Editorial Universidad Católica de Córdoba), Córdoba. ISBN 978-987-626-013-8
- Coirini, R., M. Karlin, G. Reati, M. Allier, & C. Ávalos. 2010. Manejo sustentable del ecosistema Salinas Grandes, Chaco Árido. Córdoba: Encuentro Grupo Editor.
- Elmqvist, T., & Cox, P. A. 1996. The evolution of vivipary in flowering plants. *Oikos*, 3-9.
- Escudero, A., L. Giménez-Benavides, J. M. Iriondoand, A. Rubio. 2004. Patch Dynamics and Islands of Fertility in a High Mountain Mediterranean Community Arctic, Antarctic, and Alpine Research, Vol. 36, No. 4, 2004, pp. 518–527
- Fortin, M.-J., and Dale, M.R.T. 2005. *Spatial analysis: a guide for ecologists*, Cambridge University Press.
- Gallardo, A., Maestre, F. T. 2008. Métodos geoestadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. In Maestre F. T., A. Escudero y A. Bonet (eds.). *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*, p. 215-272. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.
- Giménez, A. M., Hernández, P., Figueroa, M. E., & Barrionuevo, I. 2011. Diversidad del estrato arbóreo en los bosques del Chaco Semiárido. *Quebracho (Santiago del Estero)*, 19(1), 24-37.
- Grigore, M.-N., Toma, C., & Boşcaiu, M. 2010. Dealing with halophytes: an old problem, the same continuous exciting challenge. *Analele științifice ale Universității "Al. I. Cuza" Iași, Biologie vegetală*, Tomul LVI, fasc. 1, s.II a
- Hacker, S. D., & Bertness, M. D. 1995. Morphological and physiological consequences of a positive plant interaction. *Ecology*, 2165-2175
- Huchzermeyer, B., & Flowers, T. 2013. Putting halophytes to work—genetics, biochemistry and physiology. *Functional Plant Biology*, 40(9), v-viii.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. 1978. Mining geostatistics. Academic press
- Larcher, W. 1977. Ecofisiología Vegetal. Ediciones Omega.
- Ledesma, N. R., & Boletta, P. E. 1972. Clima de las regiones forestales argentinas. [Climate of the argentine forest regions]. *In* 7. Congreso Forestal Mundial, Buenos Aires (Argentina). 4 Oct 1972.
- Legendre, P., & Fortin, M. J. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 80 (2), 107-138.
- Legendre, P.; & L. Legendre. 1998. Numerical ecology. 2nd English edition. Elsevier, Amsterdam
- Li, C., Li, Y., & J. Ma. 2011. Spatial heterogeneity of soil chemical properties at fine scales induced by *Haloxylon ammodendron* Chenopodiaceae plants in a sandy desert. *Ecological research* 262, 385-394.
- Lorenz, G. 1995. Caracterización ecológica de un suelo Eutric Regosol bajo bosque en el Chaco Semiárido, Argentina. *Quebracho*, 3, 13-23
- Lorenz, G. 2005. Métodos de análisis de suelos. Serie Didáctica N° 12. Cátedra De Edafología Forestal. Facultad De Ciencias Forestales. Unse, Santiago Del Estero, Argentina
- Lorenz, G. 2009. Ambientes salinos: las dos caras de un fenómeno regional. *In* Giannuzzo, NA & ME Ludueña (eds.). Cambios y problemas ambientales: perspectivas para la acción pp 255-273. 1a Ed.- Univ. Nacional de Santiago del Estero.
- Maestre, F. T. & Escudero, A. 2008. Capítulo I: Introducción. *In* Maestre F. T., A. Escudero y A. Bonet (eds.). Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones, pp 1-32. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.
- Maestre, F. T. & J Cortina. 2002. Spatial pattern of soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant and Soil* 241: 279-291
- Mitlöhner, R. 1990. Die konkurrenz der Holzagwächse im regengrünen Trockenwald des Chaco Boreal, Paraguay. Universität Göttinger, Göttinger Beitr. Zur Land-und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen. N° 54, 177 p.
- Moffett, Kb; Da, Robinson & Sm, Gorelick. 2010. Relationship of salt marsh vegetation zonation to spatial patterns in soil moisture, salinity, and topography. *Ecosystems* 13: 1287–1302
- Olano, J. M., & Luzuriaga, A. L. 2008. Métodos para incorporar la estructura espacial en el análisis de datos multivariantes. *In* Maestre F. T., A. Escudero y A. Bonet (eds.). Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones, pp. 303-344. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.
- Parida, A. K., & Das, A. B. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 60(3), 324-349.
- Pendleton, R. L., S. D. Nelson, & R. L. Rodriguez. 2010. Do soil factors determine the distribution of spineless hopsage (*Grayia brandegei*)? [http://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr338/int_gtr338_205_209.pdf]; Consultado: 28/02/2012].
- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>.
- Ragonese, A. 1951. La vegetación de la República Argentina. II.- Estudio fitosociológico de las Salinas Grandes. *Rev. Inv. Agr.* 51-2:1-233.

- Rogers, M. E., A. D. Craig, R. E. Munns, T. D. Colmer, P. G. H. Nichols, C. V. Malcolm, E.G. Barrett-Lennard, A. J. Brown, W. S. Semple, P. M. Evans, K. Cowley, S. J. Hughes, R. Snowball, S. J. Bennett, G. C. Sweeney, B.S. Dear and M. A. Ewing. 2005. The potential for developing fodder plants for the salt-affected areas of southern and eastern Australia: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45, 301–329.
- Rostagno, C. M., H. F. Del Valle, & L. Videla. 1991. The influence of shrubs on some chemical and physical properties of an arid soil in north-eastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments* 202: 179-188.
- Roth, I., & A. M. Giménez, 2006. Argentine Chaco forests: dendrology, tree structure, and economic use. 1. The semi-arid Chaco. *Encyclopedia of Plant Anatomy*. 180 pp. Gebrüder Borntraeger. Berlín
- Schofield, R. V., & M. J. Kirkby, Application of salinization indicators and initial development of potential global soil salinization scenario under climatic change, *Global Biogeochem. Cycles*, 173, 1078, doi:10.1029/2002GB001935, 2003.
- Shainberg, I. 1975. Salinity of soils - Effects of salinity on the physics and chemistry of soils. *In* Poljakoff-Mayber A. & J. Gale (eds). *Plants in saline environments* pp. 39-55. Springer Berlin Heidelberg.
- Sharma, M. L., & D. J. Tongway. 1973. Plant induced soil salinity patterns in two saltbush *Atriplex* spp. communities. *Journal of range management*, 121-125
- Shimizu, Y., Ando, M., & Sakai, F. 2002. Clonal structure of natural populations of *Cryptomeria japonica* growing at different positions on slopes, detected using RAPD markers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 30(8), 733-748
- Sonmez, S., Buyuktas, D., Okturen, F., & Citak, S. 2008. Assessment of different soil to water ratios (1: 1, 1: 2.5, 1: 5) in soil salinity studies. *Geoderma*, 144(1), 361-369
- Soteras, F., Cofré, N., Bartoloni, J., Cabello, M., & Becerra, A. 2013. Hongos arbusculares (Glomeromycota) en la rizósfera de *Atriplex lampa* en dos ambientes salinos de córdoba: influencia de la profundidad en la colonización radical y presencia de morfoespecies. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 48(2), 0-0.
- Taleisnik, E., & D. López Launestein. 2011. Leñosas perennes para ambientes afectados por salinidad. Una sinopsis de la contribución argentina a este tema. *Ecología Austral*, 21:3-14.
- Tirado, R., & Pugnaire, F. I. 2003. Shrub spatial aggregation and consequences for reproductive success. *Oecologia*, 1362: 296-301.
- Ungar, I. A. 1978. Halophyte seed germination. *The Botanical Review*, 44(2), 233-264.
- Yang, F., Zhang, G., Yin, X., & Liu, Z. 2011. Field-scale spatial variation of saline-sodic soil and its relation with environmental factors in western Songnen plain of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 82, 374-387.
- Yarranton, G. A., & Morrison, R. G. 1974. Spatial dynamics of a primary succession: nucleation. *The Journal of Ecology*, 417-428.
- Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, H. Hu, X. Yao, & R. Zhong, 2014. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 104: 23-33.